

文章编号:1007-2780(2018)08-0638-07

低 LUMO/HOMO 共轭聚合物的制备 及其电子传输性能

汪霏霏, 汪 东, 张国兵*, 邱龙臻

(特种显示技术国家工程实验室 现代显示技术省部共建国家重点实验室培育基地
合肥工业大学光电技术研究院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为了探究聚合物结构与性能的关系,获得电子传输型半导体材料。采用 Stille 交叉偶联反应,制备了基于噻吩-氰基乙烯-噻吩(TCNT)和 2-氧吡啶-3-亚基-二氢吡咯吡啶-二酮(BDID)结构的一种新型的低能带隙给体-受体共轭聚合物 PBDID-TCNT。采用热重分析仪、示差扫描量热仪、紫外-可见-近红外分光光度计、电化学工作站与原子力显微镜等测试手段对聚合物的热性能、光学性能、电化学性能以及微观结构进行了表征。结果表明:聚合物 PBDID-TCNT 具有优异的热稳定性,宽的吸收光谱,低的最低未占轨道/最高占有轨道能级(LUMO/HOMO)。首次制得了 PBDID-TCNT 型的聚合物,以聚合物为半导体层的有机薄膜晶体管器件展现出电子传输特性,电子迁移率达到 $0.11 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,同时开关比超过 10^5 。

关键词:共轭聚合物;电子传输;有机薄膜晶体管

中图分类号:TN304 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183308.0638

Preparation and electron transport properties of low LUMO/HOMO conjugated polymers

WANG Fei-fei, WANG Dong, ZHANG Guo-bing*, QIU Long-zhen

(*National Engineering Laboratory of Special Display Technology,
National Key Laboratory of Advanced Display Technology,
Academy of Opto-electronic Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*)

Abstract: A novel low bandgap donor-acceptor conjugated polymer (PBDID-TCNT) was prepared by Stille cross-coupling reaction to explore the relationship between polymer structure and performance and obtain electron transport type semiconductor material. The thermal, optical, electrochemical properties, and microstructures were investigated using thermogravimetric (TG), different scanning calorimetry (DSC), ultraviolet-visible-near infrared spectrometer (UV-Vis-NIR), cyclic voltammetry (CV) and atomic force microscope (AFM). The polymer has excellent thermal stability, broad absorp-

收稿日期:2018-03-06; **修订日期:**2018-04-17.

基金项目:国家自然科学基金(No.51573036);中央高校基本科研业务费专项

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.51573036); the Fundamental Research Funds for the Central Universities

* 通信联系人, E-mail: gbzhang@hfut.edu.cn

tion spectra, deep-lying lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) energy level and low highest occupied molecular orbital (HOMO) energy level. For the first time, a PBDID-TCNT type polymer was obtained. And the organic thin-film transistors (OTFTs) were also fabricated using the new polymer as the semiconductor layer with bottom gate/top contact configuration. The devices provided high electron mobility up to $0.11 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ under vacuum condition and the $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ ratio over 10^5 .

Key words: conjugated polymer; electron transport; organic thin-film transistor

1 引言

有机薄膜晶体管(OTFTs)由于在低成本、大面积溶液处理柔性电子器件中具有潜在的应用前景而受到了广泛关注^[1-4]。近年来,很多研究都证明了低能带隙给体-受体(D-A)共轭聚合物结构在提高晶体管性能方面发挥了重要作用,D-A 聚合物具有分子内的推-拉相互作用,而且这种相互作用可以通过改变给体和受体单元来调节,从而获得高的迁移率^[5]。在已报道的D-A 聚合物中,给体单元使用最多是联噻吩(DT),并噻吩(TT)以及反-二(2-噻吩基)乙烯(TVT),而受体单元,使用最为广泛的是噻吩吡咯并吡咯二酮(DPP),萘酰亚胺(NDI),异靛蓝(ID)及其衍生物单元^[6-8]。这些共轭聚合物获得的最大空穴和电子迁移率分别超过了 $10 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 和 $1 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ^[9-10]。尽管如此,绝大部分共轭聚合物都是空穴传输材料,其中比较具有代表性的一类是聚噻吩类材料,其中最典型的是聚 3-己基噻吩(P3HT),其最高占有轨道能级(HOMO)和最低未占轨道能级(LUMO)较高,影响了电子的注入和传输,从而显示空穴传输特性。电子传输材料无论在种类、数量以及性能方面都还大大落后于空穴传输材料。要获得稳定的电子传输性能,首先要具有低的 LUMO($\sim -4.0 \text{ eV}$),其次也要具有低的 HOMO。因此,共轭聚合物中给体和受体单元的选择极为关键,它们将直接影响材料的传输特性。

降低 LUMO/HOMO 的常规方法是引入一个强的受体单元,使其再与另外一个给体单元聚合^[2]。本文除了引入一个强受体单元外,还在给体单元中也引入一个缺电子基团,使能级进一步降低。根据这一设计思路,以噻吩-氰基乙烯-噻吩(TCNT)为给体单元,异靛蓝衍生物 2-氧吡咯-

3-亚基-二氢吡咯吡啶二酮(BDID)为受体单元,制备了一种新型共轭聚合物 PBDID-TCNT。TCNT 单元中带有缺电子的氰基,BDID 单元中带有内酯基团的苯并二咪唑二酮,两边联结两个内酰胺基团,使得 BDID 单体不仅有延长的共轭结构,而且是一个强受体单元,将其与 TCNT 共聚将更有利于获得具有电子传输性能的聚合物半导体材料。本文系统研究了该聚合物的热性能、光学性能、电化学性能以及场效应性能,其电子迁移率超过 $0.1 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,开关比超过 10^5 。

2 实验

2.1 试剂与仪器

(E)2,3-双(5-(三甲基锡烷基)噻吩-2-基)丙烯腈(M1 单体):分析纯,购买自苏州纳凯科技有限公司,三(二亚苄基丙酮二钯)($\text{Pd}_2(\text{dba})_3$):分析纯,三邻甲基苯基膦($\text{P}(\text{o-tol})_3$):分析纯,购买自百灵威科技有限公司;其它化学试剂均为分析纯,均购买于国药化学试剂公司;实验中所用的甲苯在氮气环境下采用钠丝回流除水。

核磁共振图谱采用美国安捷伦科技公司的 VNMRs600 超导核磁共振波谱仪获得:600 MHz, C_6D_6 做溶剂,TMS 为内标;热重分析和示差扫描量热(TG 和 DSC)采用美国 TA 公司 Q5000IR 和 Q2000 仪器;氮气条件下,升温速率为 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$;元素分析采用德国 Elementar 公司 Vario EL c 仪器;紫外-可见-近红外光谱(UV-Vis-NIR)采用美国安捷伦公司 CARY5000 仪器:波长范围 175~3 300 nm,分辨率 $\leq 0.2 \text{ nm}$;液相凝胶色谱分析(GPC)采用美国 Waters 公司 1525-GPC 系列液相色谱仪:测试温度为 $120 \text{ }^\circ\text{C}$,1,2,4-三氯苯作为流动相,聚苯乙烯作为标准相,流速为 $1 \text{ mL}/\text{min}$;电化学测试采用 CHI660 系列电化学工作站:由三电极组成,铂盘为工作电极,铂丝为辅助电极, Ag/Ag^+ 为参比电极,在六氟磷

酸铵的乙腈溶液中进行测试,溶液经过氮气置换除氧,聚合物膜涂在铂盘电极上,测试还原/氧化电势用二茂铁(Fc/Fc^+)做内标,相对于参比电极(Ag/Ag^+)的电势为 0.05 V;聚合物薄膜形貌采用美国 Bruker 公司 Dimension 原子力显微镜表征。

2.2 聚合物的合成

单体和聚合物(PBDID-TCNT)的合成路线如图 1 所示,单体合成参考文献[11]。聚合物详细合成步骤如下:

聚合管中加入锡单体 TCNT (M1) (0.041 g, 0.08 mmol)、溴化单体 BDID (M2) (0.13 g, 0.08 mmol)以及甲苯 (10 mL),单体充分溶解后,用氮气置换 30 min,快速加入催化剂 $\text{Pd}_2(\text{dba})_3$ (0.004 g, 0.004 mmol)和配体 $\text{P}(\text{o-tolyl})_3$

(0.005 g, 0.018 mmol),再继续用氮气置换 15 min,然后密封聚合管,于 110 °C 反应 2 d。反应结束后物料冷却至室温,加入甲醇过滤沉淀,沉淀物分别用甲醇、石油醚、二氯甲烷以及氯仿进行索氏提取。留下氯仿溶解部分,旋蒸氯仿溶液至 20 mL 左右,滴加至 200 mL 甲醇溶液中沉淀,沉淀物过滤后在真空烘箱中于 50 °C 下干燥 12 h 得到黑色固体产物 (140 mg, 产率 90%)。¹H NMR (600 MHz, C_6D_6): δ =8.5~9.5 (br, 4 H), 5.5~7.5 (br, 9 H), 3.3~3.6 (br, 4 H), 1.2~2.9 (br, 146 H), 0.8~1.0 (br, 12 H)。Mn = 21.961 kDa, M_w = 55.965 kDa (PDI = 2.54),元素分析: $(\text{C}_{117}\text{H}_{175}\text{N}_3\text{O}_6\text{S}_2)_n$ 测试值: C, 78.56%, H, 9.90%, N, 2.46%, 计算值: C, 78.83%, H, 9.83%, N, 2.36%。

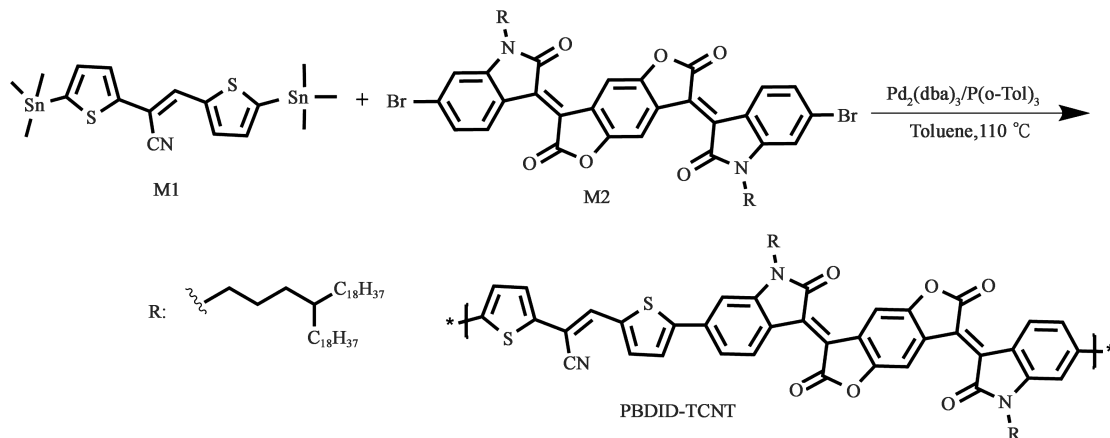


图 1 聚合物 PBDID-TCNT 的合成

Fig.1 Synthetic route of polymer PBDID-TCNT

2.3 器件制备

场效应器件采用底栅/顶接触结构,以掺杂的硅片为基底和栅极,介电层 SiO_2 厚度为 300 nm。采用十八烷基三氯硅烷(OTS)对介电层处理,聚合物的氯仿溶液 (5 mg/mL) 以 3 000 r/min 的速率旋涂于处理后的硅片上。器件经过不同温度退火处理,然后真空蒸镀源、漏(金)电极,厚度约为 40 nm。器件沟道长(L)和宽(W)分别为 100 μm 和 800 μm 。器件通过 Keithley 4200-SCS 半导体测试仪器表征。电子迁移率 μ 通过公式 $I_d = (W/2L)C_i\mu(V_g - V_{th})^2$ 计算所得,其中 I_d 是饱和区域的漏电流, C_i 是介电层的电容, V_{th} 是阈值电压, V_g 是栅极电压。

3 结果与讨论

3.1 热性能

聚合物的热重曲线如图 2 (a)所示,5%失重温度达到 395 °C,表明聚合物 PBDID-TCNT 具有优异的热稳定性,完全满足在有机薄膜晶体管以及其他光电器件中的应用要求。聚合物的 DSC 曲线如图 2 (b)所示,图中清晰地显示聚合物的吸热峰和放热峰分别在 18 °C 和 13 °C,这是聚合物烷基链的相转变温度。而聚合物的主链结构在温度测试范围内没有明显的相转变过程。

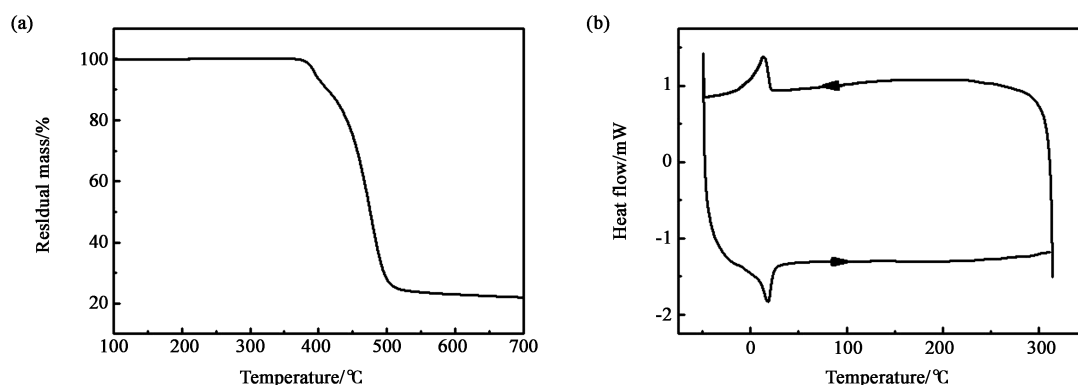


图2 聚合物 PBDID-TCNT 的(a) TG 和(b) DSC 曲线

Fig.2 (a) TG and (b) DSC curves of PBDID-TCNT

3.2 光学与电化学性能

聚合物 PBDID-TCNT 在氯仿溶液和成膜状态下的紫外-可见-近红外吸收光谱如图 3 (a) 所示。聚合物在氯仿溶液中的最大吸收峰和起始吸收峰分别在 800 nm 和 920 nm。在薄膜状态下的最大吸收峰没有发生红移,但是吸收峰范围相比溶液的吸收峰范围明显变宽,而且薄膜状态下的肩峰也更加明显,这说明聚合物分子链在成膜之后堆积更为有序。聚合物薄膜的起始吸收值 λ_{onset} 为 950 nm, 光学能带隙通过公式 $E_g = 1240/\lambda_{\text{onset}}$ 计算得到,其值为 1.30 eV。聚合物的 LUMO 和 HOMO 通过循环伏安测定,如图 3 (b) 所示。聚合物的起始还原电势 $E_{\text{onset}}^{\text{red}}$ 为 -0.78 V, 起始氧化电势 $E_{\text{onset}}^{\text{ox}}$ 为 0.98 V。根据公式 LUMO 或 HOMO = $[E_{\text{onset}}(\text{Fc}/\text{Fc}^+ \text{ vs } \text{Ag}/\text{Ag}^+) - E_{\text{onset}} - 4.8] \text{ eV}$ 计算聚合物的 LUMO 或 HOMO,这里 4.8 eV 是二茂铁(Fc/Fc^+) 在真空情况下的能级, $E_{\text{onset}}(\text{Fc}/\text{Fc}^+ \text{ vs } \text{Ag}/\text{Ag}^+)$ 为二茂铁(Fc/Fc^+) 相对参比电极 (Ag/Ag^+) 的电势^[10], 其测试值为 0.05 V。因此聚合物的 LUMO 和 HOMO 分别为 -3.97 eV 和 -5.73 eV。可见该聚合物既具有很低的 LUMO, 有利于电子的注入和传输,又具有很低的 HOMO, 增加了空穴的注入势垒,因此根据电化学性能可以判断聚合物具有电子传输特性。聚合物电化学能带隙为 1.76 eV, 比光学能带隙(1.30 eV) 大 0.46 eV, 这一方面因为电荷注入的过程中存在接触势垒, 另一方面是由聚合物材料的激子结合能引起的^[13-14]。

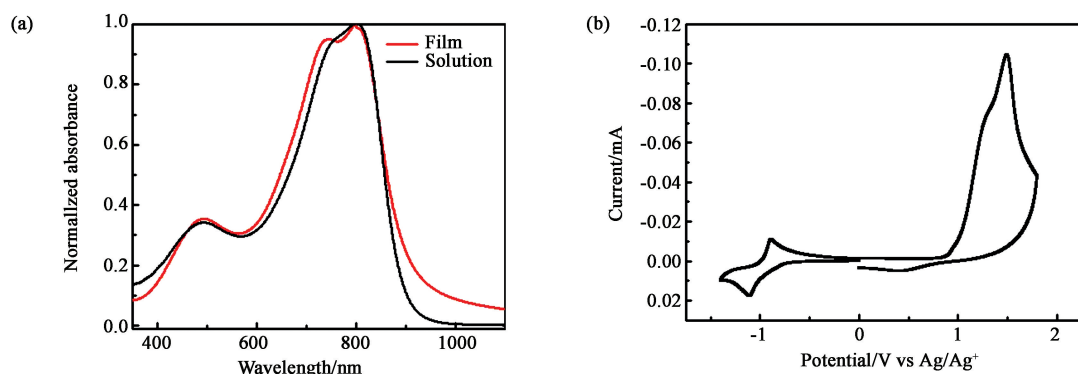


图3 (a) 聚合物 PBDID-TCNT 的紫外-可见-近红外吸收光谱, (b) 循环伏安曲线

Fig.3 (a) UV-Vis-NIR spectra of PBDID-TCNT, (b) Cyclic voltammogram of PBDID-TCNT

3.3 器件性能

OTFTs 器件采用底栅/顶接触结构,其基底和栅极直接接触,有机半导体薄膜位于绝缘层和源、漏电极之间,具体结构见图 4 (a)。由于

介电层的表面性质对薄膜的有序性有很大的影响,进而影响器件的性能,我们采用了 OTS 修饰 SiO_2 表面。制作的器件通过 Keithley 4200-SCS 半导体测试仪器来测量其电流-电压的关系,并

计算聚合物的电荷迁移率。聚合物的薄膜晶体管器件在真空环境中测试,在真空中显现出电子传输特性,具体的性能如表 1 所示。在室温下最大电子迁移率($\mu_{e,max}$)为 $0.07\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,开关比高达 10^5 。在 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 下退火 30 min,最大电子迁移率($\mu_{e,max}$)上升到 $0.11\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,平均值为 $0.09\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,开关比仍然高达 2.4×10^5 。随着退火温度进一步升高,性能基本不变。退火后器件性能有了一定的提高,这是因为退火能去除器件中的残留溶剂等载流子陷

阱,使得器件的膜更加平整有序,同时退火会使得聚合物链排序堆积得更为紧密,降低了层间距,更有利于载流子的传输^[13-14]。最优化的退火温度为 $180\text{ }^\circ\text{C}$,典型的输出曲线和转移特性曲线如图 4 (b), 4 (c) 所示。图 4 (b) 输出曲线中聚合物的源漏电压全为正值,图 4 (c) 转移特性曲线在负的源漏电压区域没有明显的弧度曲线,没有呈现出 V 状图样,并且在真空环境下测试聚合物也未显现出空穴传输特性,这些都显示聚合物器件具备电子传输特性。

表 1 聚合物为半导体层的晶体管器件性能表
Tab.1 Devices performances of OTFTs based on polymer

Annealing Temperature/ $^\circ\text{C}$	n-channel			
	$\mu_{e,max}/$ ($\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\mu_{e,avg}/$ ($\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	I_{on}/I_{off}	V_{th}/V
No Annealing	0.07	0.06	3.5×10^5	24.1
180	0.11	0.09	2.4×10^5	19.7
260	0.11	0.06	2.4×10^5	23.5
290	0.10	0.08	8.9×10^5	20.2

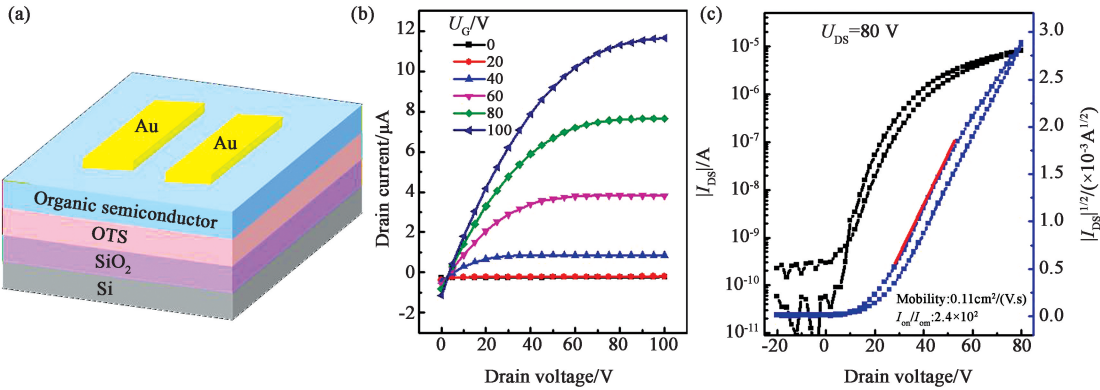


图 4 (a) 底栅/顶接触结构图聚合物薄膜器件 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 退火后的 (b) 输出曲线和 (c) 转移特性曲线
Fig.4 (a) Structure of bottom gate/top contact device, (b) output and (c) transfer characteristics of polymer annealed at $180\text{ }^\circ\text{C}$

3.4 微观结构分析

聚合物薄膜经过 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 退火后的掠角 X-射线衍射和原子力显微镜表征结果如图 5 所示。图 5 (a) 显示,聚合物薄膜具有 (100), (200), (300) 有序的衍射峰,表明聚合物具有有序的晶体结构^[17],层间距为 3.468 nm 。同时在面内 (in-plane) 具有强的 (010) 衍射峰,而且在面外 (out-of-plane) 也带有相对较弱 (010) 衍射峰,这表明聚

合物分子链主要是以与基底平行的方式排列的,但同时也有部分与基底垂直的排列方式。聚合物 PBDID-TCNT 的 π - π 堆积距离为 0.349 nm ,如此小的 π - π 堆积距离表明其分子间存在着很强的相互作用,有利于分子间 π 轨道的重叠,进而有利于电子的传输。原子力高度图如图 5 (b) 所示,聚合物薄膜的表面粗糙度 (RMS) 为 1.05 nm 。聚合物薄膜由细小的纳米纤维网络结构组成,并分布

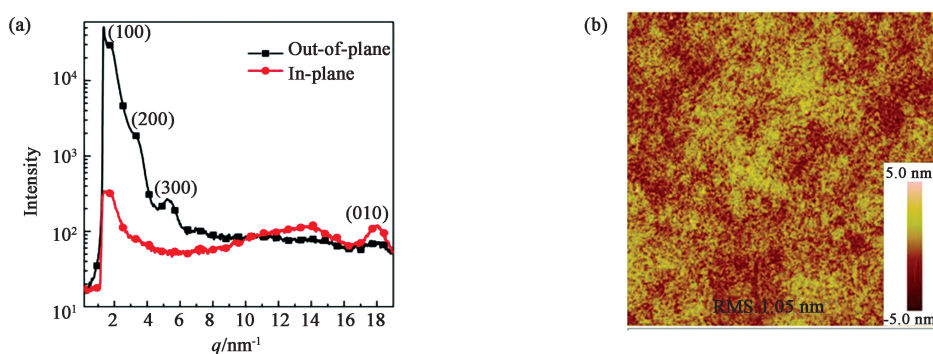


图5 聚合物薄膜 180 °C 退火的(a) 掠角 X-射线衍射(GIXRD) 和(b) 原子力高度图(5 $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$)

Fig.5 (a) GIXRD and (b) AFM image (5 $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$) of polymer films annealed at 180 °C

于整个区域,这是由分子间的强相互作用导致的,表明聚合物 PBDID-TCNT 在薄膜状态下有很强的结晶倾向并且形成了有序分子链排列,这种形貌有助于为载流子提供有效的传输途径^[18]。

4 结 论

制备了一种新型低能带隙 D-A 共轭聚合物,该聚合物具有优异的热稳定性,宽的吸收光谱,很低的 LUMO/HOMO 以及有序的晶体结构。以聚合物为半导体层的有机薄膜晶体管器件表现出明显的电子传输特性,电子迁移率达

到 $0.11 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,而且具有超过 10^5 的开关比。本文证明了引入强受体单元的同时在给体单元中也引入一个缺电子基团的方法设计聚合物能够得到电子传输型有机半导体材料,并且有较高的性能。

随着用于有机薄膜晶体管的半导体材料不断发展,深入研究现有的结构单元,结合材料的结构特性,设计合成出理想的材料是现在研究的重要方向。本文的工作为合成新型电子传输型有机半导体材料提供一种思路,未来需要更多科研人员致力于该领域的研究,推动有机薄膜晶体管的发展。

参 考 文 献:

- [1] ZHAO Y, GUO Y L, LIU Y Q. 25th Anniversary article: recent advances in n-type and ambipolar organic field-effect transistors [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(38): 5372-5391.
- [2] ZAUMSEIL J, SIRRINGHAUS H. Electron and ambipolar transport in organic field-effect transistors [J]. *Chemical Reviews*, 2007, 107(4): 1296-1323.
- [3] 王晓鸿,邱龙臻.基于聚噻吩/聚己内酯共混物的有机薄膜晶体管[J].发光学报,2012,33(8):857-862.
WANG X H, QIU L Z. Organic thin film transistors based on blends of poly(3-hexylthiophene) and polycaprolactone [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(8): 857-862. (in Chinese)
- [4] 王伟,马东阁,高强,等.多层栅介质层有机薄膜晶体管的存储与光响应特性[J].发光学报,2011,32(7):729-735.
WANG W, MA D G, GAO Q, et al. Memory and photo-responses characteristics of organic thin film transistors based on multi-layer gate dielectric [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, 32(7): 729-735. (in Chinese)
- [5] WANG C L, DONG H L, HU W P, et al. Semiconducting π -conjugated systems in field-effect transistors: a material odyssey of organic electronics [J]. *Chemical Reviews*, 2012, 112(4): 2208-2267.
- [6] NIELSEN C B, TURBIEZ M, MCCULLOCH I. Recent advances in the development of semiconducting DPP-containing polymers for transistor applications [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(13): 1859-1880.
- [7] GUO X G, KIM F S, SEGER M J, et al. Naphthalene diimide-based polymer semiconductors: synthesis, structure-property correlations, and n-channel and ambipolar field-effect transistors [J]. *Chemical Reviews*, 2012, 24(8): 1434-1442.
- [8] STALDER R, MEI J G, GRAHAM K R, et al. Isoindigo, a versatile electron-deficient unit for high-performance

- organic electronics [J]. *Chemistry of Materials*, 2013, 26(1): 664-678.
- [9] CHEN H J, GUO Y L, YU G, *et al.* Highly π -extended copolymers with diketopyrrolopyrrole moieties for high-performance field-effect transistors [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(34): 4618-4622.
- [10] KANG B, KIM R, LEE S B, *et al.* Side-chain-induced rigid backbone organization of polymer semiconductors through semifluoroalkyl side chains [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2016, 138(11): 3679-3686.
- [11] YAN Z Q, SUN B, LI Y N. Novel stable (3E,7E)-3,7-bis(2-oxindolin-3-ylidene)benzo[1,2-*b*:4,5-*b'*]difuran-2,6(3H,7H)-dione based donor - acceptor polymer semiconductors for n-type organic thin film transistors [J]. *Chemical Communications*, 2013, 49(36): 3790-3792.
- [12] NAGAMATSU S, OKU S, KURAMOTO K, *et al.* Long-term air-stable n-channel organic thin-film transistors using 2,5-difluoro-1,4-phenylene-bis{2-[4-(trifluoromethyl)phenyl]acrylonitrile} [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(6): 3847-3852.
- [13] BERDAS J L. Mind the gap! [J]. *Materials Horizons*, 2014, 1(1): 17-19.
- [14] 林广庆, 李鹏, 王明辉, 等. 表面修饰制备高性能薄膜晶体管[J]. 液晶与显示, 2013, 28(4): 490-494.
LIN G Q, LI P, WANG M H, *et al.* Preparation of high-performance organic thin-film transistor through surface modification [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(4): 490-494. (in Chinese)
- [15] 谢应涛, 欧阳世宏, 王东平, 等. 聚合物薄膜晶体管制备条件对其性能影响分析[J]. 液晶与显示, 2015, 30(3): 427-431.
XIE Y T, OUYANG S H, WANG D P, *et al.* Influence of fabrication process on performance of polymeric thin-film transistor [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(3): 427-431. (in Chinese)
- [16] HONG W, SUN B, AZIZ H, *et al.* A conjugated polyazine containing diketopyrrolopyrrole for ambipolar organic thin film transistors [J]. *Chemical Communications*, 2012, 48(67): 8413-8415.
- [17] KIM G, KANG S J, DUTTA G K, *et al.* A thienoisindigo-naphthalene polymer with ultrahigh mobility of 14.4 cm²/V·s that substantially exceeds benchmark values for amorphous silicon semiconductors [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2014, 136(26): 9477-9483.
- [18] LEI T, DOU J H, CAO X Y, *et al.* A BDOPV-based donor - acceptor polymer for high-performance n-type and oxygen-doped ambipolar field-effect transistors [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(45): 6589-6593.

作者简介:汪霏霏(1994—),女,安徽合肥人,2016年于郑州大学获得学士学位,主要从事机有机半导体合成和性能研究。E-mail: wffzdx2012@163.com

张国兵(1977—),男,安徽安庆人,副研究员,2001年于合肥工业大学获得学士学位,2011年于上海交通大学获得博士学位,主要从事有机薄膜晶体管器件的研究。E-mail: gbzhang@hfut.edu.cn